

VEEKEERIST, LINNUPARVE JA MAJANDUST ÜHENDAB ISEORGANISEERUMINE

TOOMAS KIRT
HANNES PAHAPILL

Iseorganiseerumine tähistab protsessi, mille tulemusena süsteemi, tavaliselt avatud süsteemi sisemine organiseeritus suureneb iseeneslikult, ilma et seda juhitaks väljastpoolt. Süsteemi organiseerituse põhjustavad süsteemi komponentide vastastikused mõjutused.

Igal teadusharul on oma lemmiklaused, millega alustatakse artikleid. Iseorganiseerumise puhul kohtab pea kõigis teaduslikes publikatsioonides küsimust: "Millest tuleneb kord?" Tõepoolest – me ümber on palju korrapärasust. Vaadake kas või iseeneslikult tekkinud korrapäraseid veekeeriseid, kasvavat taime, kolmnurkset linnuparve, toimivat ökosüsteemi, majandust ja teadust. Või iseene mõtlemist, mis samuti püüab kõiges korda luua. Võib küll väita, et kuskil on nende süsteemide suur juht, kes määrab ära, kuidas toimida, ent protsesside lähemal vaatlemisel me toda juhti siiski ei leia, vaid peame tõdema, et kord tekib süsteemi üksikute osade vahelise vastastikmõju tulemusena.

Samuti tekitab küsimusi iseeneslikult

tekkinud korra säilimine, sest termodünaamika teise seaduse kohaselt peaksid füüsilised ja keemilised süsteemid järgima teed, mis viib nad madalama energia ja suurima entroopia (korratuse) olekusse ehk siis termodünaamilisse tasakaalu. Sellele vaatamata ümbritsevad meid süsteemid ja organismid, mis on säilitanud kõrge energiataseme ja madala entroopia.

Järgnevalt püüamegi vaadata, kuidas iseorganiseeruv protsess toimib ning millised on selle põhilised omadused. Parema ülevaate saamiseks alustame näidetega, seejärel tutvume iseorganiseeruvate süsteemide põhiliste mehhanismidega ning lõpuks heidame pilgu iseorganiseerumise näitlikele mudelitele ja rakendustele.

NÄHTAMATUD KÄED

Järgnevad näited pärinevad Francis Heyligheni artiklist "The Science of Self-organization and Adaptivity", mis tasub veebist otsimist ja lugemist, kui on soov põhjalikumalt tutvuda iseorganiseeruvate ja kohanevate süsteemidega.

Üks lihtsamaid iseorganiseeruvaid protsesse on magneetumine. Tükk magneetuvat materjali (rauda) koosneb väikestest, juhuslikult orienteeritud magnetiliste omadustega osakestest. Osakeste korrastamata oleku põhjuseks on nende juhuslik liikumine. Mida kõrgem temperatuur, seda enam leiab aines aset osakeste suunda muutvat juhuslikku liikumist. Ometigi reastuvad temperatuuri alandamisel kõik need pisikesed osakesed hoopis nii, et nad osutavad ühes ja

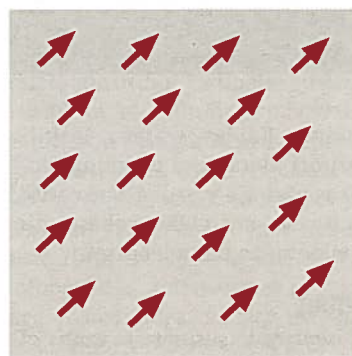
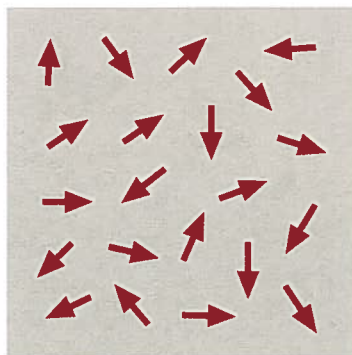
samas suunas ning loovad koos tugeva üldise magnetvälja. Reastumise aluseks on samasuunaliste magnetipooluste tõukumine ja erisuunaliste tõmbumine.

Iseorganiseerumise üheks ehadaks näiteks on ka Bénardi keerised, mis tekivad vedeliku kuumutamisel altpoolt. Kuna kuum vedelik on külmast kergem, surub külm vesi selle üles, vajudes ise allapoole. Need kaks vastastikust liikumist ei saa leida aset ühel ajal, ilma et toimuks liikumise koordineerimine. Sellises olukorras hakkab vedelik iseorganiseeruma ning tekivad paralleelsed veekeerised, mille ühest küljest tõuseb vesi üles ja teisest laskub alla. Vedeliku molekulid jäävad liikuma seni, kuni kestab vee kuumutamine ja vee temperatuur püsib ebaühtlane.

Paljud süsteemid on oluliselt keerulisemad kui magneetumine või Bénardi keerised. Niisugune süsteem kannab nime keerukas adaptiivne süsteem (*complex adaptive system*). Tüüpilise näitena võib tuua ökosüsteemi, mis koosneb väga paljudest erinevatesse liikidesse kuuluvatest organismidest, kes mitmekülgset mõjutavad üksteist ühiselt jagatavas keskkonnas – on osa toiduahelast, moodustavad kooslusi jne. Teine näide on turg, kus konkureerivad erinevad tootjad, vahetades raha ja kaupa tarbijatega. Kuigi turg on väga kaootiline mittelineaarne süsteem, jõuab see siiski tasakaalu lähedale, milles tarbijate kõik muutlikud ja konfliktid soovid saavad rahuldatud. Kommunisti ebaõnnestumine näitab, et turg on palju efektiivsem majanduse korraldaja, kui seda oli kontrollitud plaanimajandus. Turg on nagu müstiline jõud, mis tagab, et kaupa toodetakse õiges koguses ja tarnitakse õigesse kohta. Seda, mida turumajanduse isaks tituleeritud Adam Smith nimetas nähtamatuks käeks, kutsutakse tänapäeval iseorganiseerumiseks.

ISEORGANISEERUMINE versus TERMODÜNAAMIKA

Kuidas suudab iseorganiseeruv süsteem säilitada kõrge energeetilise oleku ja korrastatuse, mis on vastuolus termodünaamika seadustega? Vältimaks jõudmist soojussurma (*heat death*) ehk termodünaamilisse tasakaalu, kus kogu süsteemi energia on ära kasutatud ja entroopia maksimaalne, peab iseorganiseeruv süsteem olema avatud ning vahetama ümbritseva keskkonnaga energiat või materiat. Nobeli preemia laureaat Ilya Prigogine kasutas sellise süsteemi kirjeldamiseks mõistet hajuv struktuur. Sellise süsteemi entroopia hajub pidevalt,



MAGNEETUMINE.

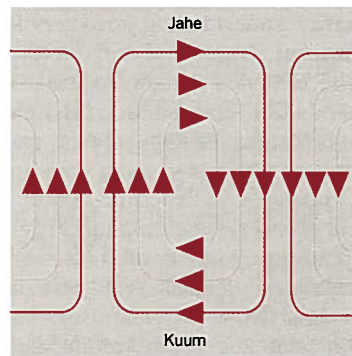
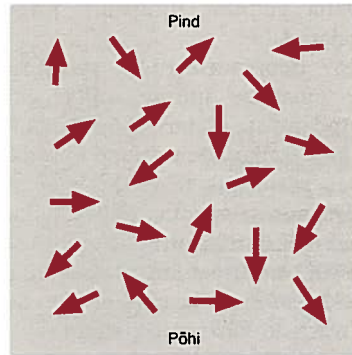
Magneetumine on üks lihtsamaid iseorganiseeruvaid protsesse. Ülal on näha osakesed korrastamata olekus, kuid all võime näha iseorganiseerumise tagajärjel tekkinud magneetunud osakeste korrastatud olekut.

kuna see saadetakse lihtsalt süsteemist välja. Nii saab hajuv struktuur suurendada enda organiseeritust väliskeskkonna korrastuse hinnaga. See süsteem pääseb mööda termodünaamika teisest seadusest lihtsalt liigest entroopiast vabaneb. Hea näitena võib tuua elusorganismi, kes tarbib madala entroopiaga valgust ja toitu ning saadab keskkonda tagasi kõrge entroopiaga jääkprodukte.

ISEORGANISEERUVA SÜSTEEMI OMADUSED

Entroopia eksportimine ei seleta veel ära iseorganiseerumise olemust. Kui vaatame eelnevalt toodud näiteid, siis kõigile neile on omane, et iseorganiseerumine tekib süsteemi osade vastastikmõju tulemusena. Üks magnetiseeritud osake mõjutab oma lähemaid naabreid ja üks vedeliku molekul pörkub läheduses asunud molekulidega, mis viib üldise korra tekkimiseni.

Järgmine märksõna, mis iseorganiseerumist iseloomustab, on mittelineaarne dünaamika. Kui tavalisele mehaanilisele süsteemile on omane lineaarsus (näiteks



BÉNARDI KEERISED.

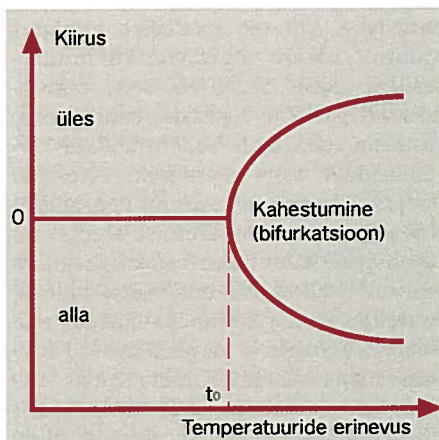
Ülemisel joonisel on näha vedelikus toimuv juhuslik liikumine. Vedeliku kuumutamisel alt ning temperatuurierinevuste kujunemisel pinnal ja põhjal tekivad vedelikus iseeneslikult veekeerised, mis on näha all.

lüües palli kaks korda kõvemini, see ka liigub kaks korda kiiremini), siis iseorganiseeruv süsteem pole nii otsest põhjus-tagajärg suhet võimalik leida, sest süsteemi tulemit mõjutavad tagasiside silmused (*feedback closure*). Tagasiside on positiivne, kui see soodustab esialgset muutust, või siis negatiivne, kui muudatus surutakse maha või seda takistatakse. Negatiivne tagasiside stabiliseerib süsteemi, positiivne soodustab aga kõrvalekaldeid ning tulemuseks võib olla hoopis teistsugune süsteemi konfiguratsioon. Kui magnetiseerumise alguses saavad paar lähestikku asuvad magnetiseeritud osakesed osutama samas suunas, suureneb nende koosmõju lähedal asuvatele osakestele ja ka need asuvad suurema tõenäosusega osutama samas suunas. See omakorda suurendab üldist magnetvälja tugevust ja protsess kiireneb, kuni kõik osakesed on reastunud ühes suunas ning süsteem läheb stabiilsesse olekusse. Nüüdsest hakkab mõju avaldama negatiivne tagasiside, mis püüab süsteemi stabiilset olekut säilitada ja vältida osakeste hälbimist üldisest

magnetvälja suunast juhusliku liikumise tagajärjel.

Asudes iseorganiseeruva süsteemi järgmise omaduse juurde, tuletagem meelde tõdemust, et tervik on midagi enam kui üksikosade summa. Iseorganiseeruvus süsteemis tekivad süsteemi osade käitumisest spontaanselt terviku omadused või struktuurid. Neid uusi omadusi või tunnuseid kutsutakse esilekerkivateks (*emergent*) ja neid ei ole võimalik tuvastada süsteemi algsade puhul. Võtame näiteks elusorganismi, mis on üles ehitatud hierarhiliselt. Rakud moodustavad kudesid ning koed tervikliku organismi. Organismi kui terviku puhul esilekerkivaid omadusi ei ole võimalik taandada üksikute osade täiendavateks omadusteks. Näiteks suudab inimene tervikuna käia, aga sama omadus puudub kudedel eraldi võetuna. Samuti ei saa neid esilekerkivaid omadusi kirjeldada väljenditega, mida kasutatakse süsteemi osade kirjeldamiseks, vaid on vaja uusi mõisteid. Lihase kirjeldamiseks kasutame mõistet kokkutõmbumine, aga organismi puhul räägime käimisest.

Lineaarsel süsteemil on tavaliselt üks lahendus, aga mittelineaarsel süsteemil on neid enamasti palju ja raske on otsustada, milline on n-õ õige. Magneetumise puhul puudub eelistus, mis suunas peaks lõplik reastumine toimuma. Iga suund on võrdväärne teistega. Bénardi keerised võivad hakata keerlema päri- või vastupäeva. Korrastatuse loomiseks on tavaliselt vajalik muutus väliskeskkonnas, mis viib süsteemi piirtingimusse (*boundary condition*), kus käivitub iseorga-



SÜSTEEMI OLEKU KAHESTUMINE.

Joonisel on näha, kuidas temperatuurierinevuste suurenemine viib süsteemi teatavas punktis staatilisest olekust välja ja tekivad veekeerised suunaga kas üles või alla. Kriitilises punktis süsteemi olekute hulk kahestub.



TIT HUNT

niseerumine. Kuidas teatava kriitilise temperatuuri ületamisel on võimalik, et tekivad kas päri- või vastupäeva keerised, st toimub süsteemi oleku kahestumine (bifurkatsioon), on näha joonisel.

KAOSE PIIRIL

Iseorganiseeruvale süsteemil saab olla palju olekuid ning neid kõiki kokku kutsutakse olekuruumiks. Mõningaid stabiilseid olekuid kogu olekuruumi hulgas, millele iseorganiseeruvale süsteemil on kalduvus läheneda, kutsutakse atraktoriteks. Süsteemi sisenemine ühte sellisesse olekusse muudab raskemaks edasise liikumise väljapoole sedasama atraktorit ning seega piirab süsteemi koostisosade edasist vabadust käituda iseseisvalt. Ühel süsteemil võib olla palju atraktoreid. Magneetumise näite puhul ei ole vahet, millises suunas magnetid reastuvad, kuid veekeerised hakkavad liikuma kas päri- või vastupäeva. Atraktorid võivad olla nii lokaalsed kui ka globaalsed. Lokaalsete ja globaalsete atraktorite erinevuse mõistmiseks on hea ette kujutada mäenõlva, mis suubub sügavasse orgu. Mäenõlv ei ole päris sile, vaid on täis kõikvõimalikke lohukesi. Kui nüüd mäenõlvalt panna veerema kuulike ja see ei jõua oru põhja, vaid jääb pidama mõnda mäenõlval leiduvasse lohku, siis jõudis süsteem lokaalsesse atraktorisse. Globaalseks atraktoriks on antud näite puhul palju sügavamal asuv oru põhi (kõige sügavam lohk).

Atraktorisse aitab süsteemil jõuda süs-

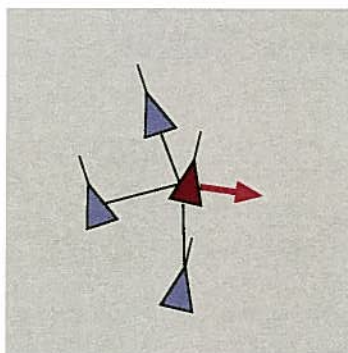
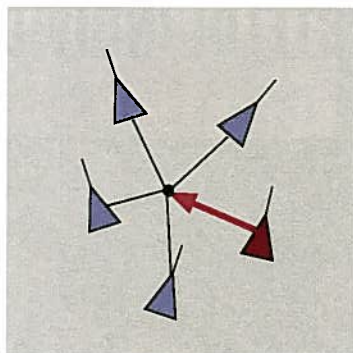
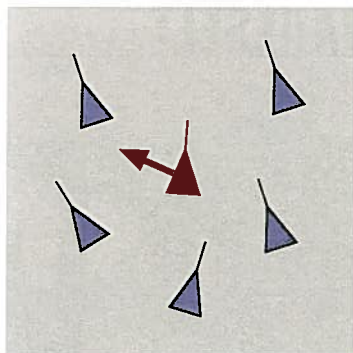
teemi osade juhuslik variatsioon ning piisavalt suure varieeruvuse korral suudab süsteem lokaalsest atraktorist isegi väljuda. Varieeruvust saab suurendada, lisades süsteemi müra ja häireid. Juhtimaks süsteemi globaalsesse atraktorisse, peab alustama piisavalt suure varieeruvusega, kuid mitte liiga suurega, et süsteem ei muutuks kaootiliseks. Sellega suudame süsteemi välja viia lokaalsetest atraktoritest, mis ei pruugi olla parimad lahendused süsteemi jaoks.

Keerukat adaptiivset süsteemi iseloomustab tugevus ja taastuvus, st süsteem suudab vastu seista häiretele ning säilitada iseenda olemasolu. Tulemaks toime häiretega, peab süsteem olema võimeline omama küllaldast tegutsemisruumi ehk varieeruvust ja valima võimalike lahenduste hulgas parima. Varieeruvust saab luua, hoides süsteemi piisavalt kaugel tasakaalust, et sellel oleks stabiilseid olekuid, mille hulgas valida. See seletab vaatlusi, mille kohaselt keerukad adaptiivsed süsteemid kalduvad paiknema kaose äärel, s.o kriitilises alas, kus väike muudatus võib viia süsteemi kaootilisele käitumisele, või vastupidiselt – suleb süsteemi kindlasse käitumisse. Nagu näiteks vedelik, mis temperatuuri tõustes muutub gaasiliseks ehk kaootiliseks ning temperatuuri alanedes muutub tahkeks ehk fikseerituks. Üleminekut ühest olekust teise kutsutakse faasisiirdeks ning seda iseloomustab äkiline muutus süsteemi olekus.

BOIDID

Craig Reynolds on esitanud ühe hea mudeli, mis simuleerib linnuparve või mõne muu kogumi käitumist. Reynolds ise nimetab parve liikmeid üldnimetusega boid, mistõttu on antud hajuskäitumise mudel rohkem tuntud ka nime *Boids* all.

SEDA, MIDA TURUMAJANDUSE ISAKS TITULEERITUD ADAM SMITH NIMETAS NÄHTAMATUKS KÄEKS, KUTSUTAKSE TÄNAPÄEVAL ISEORGANISEERUMISEKS.



PARVE LIHTNE MUDEL. Mudel allub kolmele põhireeglile, milleks on joondumine, sidusus ja eraldatus. Punase noolega on näidatud boidi liikumisvektori muutumisvektor.

Parve lihtne mudel allub kolmele põhireeglile, mis kirjeldavad, kuidas iga parve liige liigub, põhinedes lähemate parvekaaslaste asukohal, liikumiskiirusel ja -suunal:

- joondumine – muuda oma liikumissuund ja -kiirus sarnasemaks lähemate parvekaaslaste keskmisele liikumissuunale ja -kiirusele;
 - sidusus – püüa liikuda lähemate naabrite asukohtade keskpunkti suunas;
 - eraldatus – väldi kokkupõrkeid ja hoida distantsi teiste parveliikmetega.
- Need lihtsad reeglid kutsuvad esile parve keeruka käitumise, sõltumata lindude algolekust. Oluline on ära märkida, et kõik need reeglid on lokaalsed, st neid järgib üks lind.

Võimalikult realistliku mudeli loomisel tuleb arvestada veel sellega, et parveliikme käitumist ei mõjuta mitte kogu parv, vaid ainult lähimad naabrid, kes asuvad linnust teatud kaugusel ja teatud sektoris tema liikumissuuna suhtes. Lisaks on parveliikmete maksimaalne liikumiskiirus ja suunamuutmise kiirus piiratud.

Antud algoritmi erinevate variatsioonidega teostusi (näiteks Java rakenduste näol) võib internetist leida mitmeid, kuid senini on selle üheks olulisemaks rakendusvaldkonnaks, lisaks lihtsatele animatsioonidele, olnud filmitööstus. Tuntuimaks ja üheks esimeseks filmiks, kus antud iseorganiseeruvat simulatsiooni rakendati, on Tim Burtoni 1992. aastal loodud "Batmani tagasitulek". Seal kasutati nahkhiireparvede ja suure hulga pingviinide liikumise modelleerimiseks just antud põhimõtteid.

ISEORGANISEERUVUS MUUDES SÜSTEEMIDES

Nagu boidide näites on kirjeldatud, toimub süsteemi üldine iseorganiseerumine lokaalsete tegevuste ja käitumiste tagajärjel. Niisuguses süsteemis puudub

keskne juhtimine ja ühelgi süsteemi elemendil ei ole kindlaksmääratud rolli. Seetõttu on iseorganiseeruv süsteem väga veakindel, kuna teised sarnased elemendid on võimelised kompenseerima ühe elemendi "riknemist". Just nende omaduste tõttu, mida võib kohata paljudes bioloogilistes, sotsiaalsetes ja majanduslikes süsteemides, leiavad iseorganiseeruvad algoritmid ja süsteemid üha rohkem tähelepanu ka arvutiteaduses. Eriti oluline on antud kontseptsioon laiaulatuslikes hajussüsteemides (näiteks viimasel ajal eriti populaarsed kasutajalt-kasutajale ehk *peer-to-peer* failivahetustarkvara), kus ükski eraldiseisev süsteem ei oma kesket, juhtivat rolli teiste süsteemide suhtes ning mille struktuur ja koormusjaotus on ettearvatult kõikum.

Iseorganiseerumisteooria arenedes on sellest välja kasvanud veel mõned teadusharud. Kui iseorganiseerumine võimaldab süsteemil iseseisvalt areneda, siis looduslik valik võimaldab sel kohaneda keskkonnaga. Üldistades mehhanismi, millel põhineb bioloogiliste organismide võime kohaneda, lõi John Holland geneetiliste algoritmide teooria. Saades innustust eelnevatest uurimustest, arendas Chris Langton välja teadusharu, mille nimeks on tehiselu (*artificial life*). Tema loodud arvutisimulatsioonides aimatakse järele selliseid elulisi omadusi nagu paljunemine, seksuaalsus, koossevolutsioon ning võitlus kiskja ja saaklooma vahel.

PRAKTILISI LAHENDUSI ON VEEL VÄHE

Kuigi hetkel on veel suhteliselt vähe praktilisi süsteeme ja lahendusi, mis kasutavad teadlikult iseorganiseerumist, võib siiski eeldada, et neid hakatakse üha rohkem kasutusele võtma. Kuna iseorganiseeruv süsteem on ettearvatu, pole võimalik luua otseselt ennustussüsteeme. Samuti on keerukas iseorganiseeruva süsteemi juhtimine, sest väline

LINEARSEL SÜSTEEMIL ON TAVALISELT ÜKS LAHENDUS, AGA MITTELINEARSEL SÜSTEEMIL ON NEID ENAMASTI PALJU JA RASKE ON OTSUSTADA, MILLINE ON N-Õ ÕIGE.

surve ei too kaasa soovitud muutust ning liigne surve võib viia süsteemi tasakaalust välja, kaootilisse olekusse. Ent modelleerimine võimaldab leida süsteemi atraktoreid, varieeruvuse allikaid ja kriitilisi punkte, kus minimaalse jõukuluga on saavutatavad suured ennustatavad muutused. Kujutage ette kas või lillede kinkimise mõju.

Lugejad võiksid aga õppida märkama iseorganiseerumist oma igapäevases elus ning mitte panema vastutust sündmuste toimumise eest millegi kõrvalise arvele. Bioloog Stewart Kaufmann on uurinud ökosüsteemide ja organismide arenemist. Tema poolt loodud arvutisimulatsioon näitab, et piisavalt keerukas keemiliste reaktsioonide võrgustik iseorganiseerub kindlasti autokatalüütiliseks tsüklikuks, mis on elu eelkäija. Seega pole meil võib-olla vaja otsida elu aluseid millestki müstilisest, vaid hoopis lokaalsest vastastikmõju protsessist – iseorganiseerumisest. Jälgime siis, milliseks iseorganiseerumise teadus iseorganiseerub. Mida rohkem me maailma toimimisest teame, seda vähem on meil võimalust ajada oma teadmatust jumala kaela. ■

TOOMAS KIRT (1971) on Tallinna Tehnikaülikooli doktorant, uurimisteemaks andmeanalüüsi meetodid ja neurovõrgud.

HANNES PAHAPILL (1982) on Tallinna Tehnikaülikooli informaatikaturundus.

LOE VEEL

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/EOLSS-Self-Organiz.pdf> (ülevalde)

<http://www.red3d.com/cwr/papers/1987/boids.html> (boidid)